



TITLE:

# Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Matsuda, Yoshinobu

---

CITATION:

Matsuda, Yoshinobu. Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22449>

RIGHT:

許諾条件により本文は2021-03-22に公開

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	松田 祥伸
論文題目	Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters (高効率多色発光素子に向けた極性面フリーなマルチファセット InGaN-LED に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、高効率な多色発光素子を目指して、半極性 GaN 基板上のマルチファセット構造に関する結晶成長や光学特性などの基礎的知見の確立に取り組んだものである。また、同基板上のマルチファセット構造に基づく多色発光 LED の実証に成功しており、全 6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本論文の背景と目的、そして本論文の構成について述べている。InGaN を用いた可視発光素子として、近紫外から緑色波長域にかけての LED やレーザダイオード(LD)、さらには黄色の蛍光体と組み合わせた白色 LED が実用化されている。そのインパクトは大きく、一般照明などにパラダイムシフトを引き起こしている。一方で、原理的には、GaN の禁制帯幅(3.4eV)から InN のそれ(0.64 eV)に相当する波長域(365 nm - 2 μm)をカバーできるため、InGaN 系半導体のみで可視広域全域にわたる任意の多色発光スペクトルを実現出来るはずである。このような目的において、結晶工学技術を駆使した三次元マイクロ構造(マルチファセット構造)による多色発光 LED が提案されている。しかしながら、これまで提案されてきたマルチファセット構造は、その長波長発光成分が(0001)極性面に由来し、この面方位特有の大きな分極誘起電界のために高効率発光を妨げられていた。本研究では、この問題を回避するために、分極誘起電界の抑制出来る半極性面および無極性面で構成されたマルチファセット構造を提案している。</p> <p>第 2 章では、有機金属気相エピタキシャル成長(MOVPE)に基づく選択成長法を用いて、半極性{11<math>\bar{2}</math>2}GaN 基板上へのマルチファセット GaN 構造の作製を試みている。具体的には、<math>\pm(11\bar{2}2)</math>面上に様々なデザインのマスクパターンを準備し、その上に形成されるマルチファセット構造を探索することにより、極性面フリーなマルチファセット構造の作製に成功している。さらに、同構造の結晶成長過程を観察し、独自のモデル計算を用いた解析を行っており、マルチファセット構造の形状発展における原料原子の表面拡散の影響を議論している。特に、(<math>\bar{1}\bar{1}2\bar{2}</math>)面上の構造における顕著な面間拡散を見出している。</p> <p>第 3 章では、第 2 章で得られた<math>\pm(11\bar{2}2)</math>面上の極性面フリーなマルチファセット構造上への InGaN 発光層の結晶成長を試みている。室温下での基礎的な発光特性評価の結果、(<math>\bar{1}\bar{1}2\bar{2}</math>)面上のマルチファセット構造が多色発光特性を示すことを明らかにした。また、同構造の発光ダイナミクス評価により、全ての発光成分が</p>			

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	松田 祥伸
<p>(0001)極性面よりも高い輻射再結合確率を有していることが確認され、分極誘起電界の抑制が示唆された．加えて、従来の(0001)面を有するマルチファセット構造と InGaN 発光層の構造特性分布を比較し、その結晶成長ダイナミクスの議論している．本研究で得られたマルチファセット構造は、これまで議論されてきた原料原子の表面拡散に加えて、In 原子取り込み効率の面方位依存性が影響していることを明らかにしている．また、この知見に基づき、<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面上のマルチファセット構造が多色発光特性を示す機構についても明らかにしている．</p> <p>第 4 章では、<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面上のマルチファセット構造の LED デバイス化に向けて、そのドーピング条件の確立を試みている．マルチファセット構造に先だち、その基板面である<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面上の通常の平坦膜 LED を用いて、Si ドーピングによる n 型導電性制御、Mg ドーピングによる p 型導電性制御の条件を探索している．すなわち、手始めに、従来の(0001)面上のドーピング条件では、<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面特有の不純物取り込み特性によって、p 型導電性制御が困難であることを明らかにしている．そこで、特に Mg ドーピング時の結晶成長条件を適切に制御することにより、<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面においても良好な Mg ドーピングが達成される条件を確立している．さらに、確立したドーピング条件をマルチファセット構造に適用し、全ての結晶ファセット面に pn 接合を形成することに成功している．また、走査型プローブ顕微鏡により、マルチファセット構造の断面内におけるキャリアタイプおよびキャリア密度の分布を明らかにしている．</p> <p>第 5 章では、これまでに得られた結晶成長条件をもとに、<math>(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})</math>面上のマルチファセット構造の LED デバイスを作製している．三次元構造特有の問題を解決するための、最適なデバイスプロセス条件を見出している．室温下での電流注入動作を確認した結果、良好な整流性と、多色発光によるブロードな電流注入発光スペクトルが実証された．また、作製条件の工夫による発光スペクトル制御性も実証し、白色合成も実証している．これらの成果は、可視光域における任意の混合色合成を実現出来る可能性を示唆するものである．</p> <p>第 6 章では、本研究の総括と、今後の課題についてまとめている．すなわち、本研究で提案された、極性面フリーなマルチファセット LED のデバイス動作特性改善に向けた現状の問題点を指摘している．また、将来展望として、同構造が高速可視光通信光源に展開可能であることを提案している．</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は 半極性 GaN 基板上に実現される極性面フリーな InGaN 系マルチファセット構造の結晶成長および特性評価を行ったものあり、本構造からの輻射再結合確率の高い多色発光特性の観察に成功している。また、ドーピング条件やデバイスプロセスの確立により、本構造に基づく多色発光 LED の動作実証に成功している。これらの成果は、高効率多色発光素子の開発に繋がるものであり、以下の内容に纏めることができる。

1.  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上へのマルチファセット GaN 構造の結晶成長
  - ・  $(11\bar{2}2)$  面および  $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$  面上の特定のマスクデザインにおいて、極性面フリーなマルチファセット GaN 構造が形成されることを発見
  - ・ 同マルチファセット GaN 構造の結晶成長過程について、AlGaN マーカー法により定量的に評価
2.  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上の InGaN マルチファセット量子井戸 (QW) 構造
  - ・  $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$  面上の InGaN マルチファセット QW から、輻射再結合確率の高い多色発光を観測し、有用な構造であることを実証
  - ・ In 取り込み効率の面方位依存性が、InGaN 発光層の構造特性分布に寄与することを発見
3.  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上マルチファセット構造のドーピング
  - ・  $(\bar{1}\bar{1}2\bar{2})$  面上の平坦膜 LED において、ドーピング条件を確立
  - ・ マルチファセット構造の各結晶ファセット面への pn 接合の形成に成功
4.  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上マルチファセット LED の動作実証
  - ・  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上マルチファセット LED のデバイスプロセスを確立
  - ・  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上マルチファセット LED の良好な整流性と、多色発光特性の実証に成功
  - ・  $\{11\bar{2}2\}$  GaN 基板上マルチファセット LED による白色合成に成功

本論文は、新しい InGaN 系多色発光構造として、半極性 GaN 基板上への極性面フリーなマルチファセット構造の作製に成功するとともに、同構造をベースとした多色発光 LED の動作実証もおこなっており、マルチファセット GaN 構造および InGaN 発光層の結晶成長ダイナミクスについても論じている。これらのことから、可視域の多色発光素子の物性解明と制御において、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 2 月 14 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。